

聚焦碳排放

晶硅太阳能在“双碳”经济中的作用与影响

严大洲^{1,2,3}, 刘艳敏⁴, 万 焱^{1,2,3}, 杨永亮¹, 杨 涛^{1,3}, 孙 强^{1,2},
赵 雄^{1,2,3}, 张升学¹, 张志刚¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 洛阳中硅高科技有限公司, 河南 洛阳 471003;
3. 硅基材料制备技术国家工程研究中心, 河南 洛阳 471003; 4. 中国有色工程有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 我国的碳排放居世界首位,2020 年碳排放量为 115 亿 t。在我国一次能源消费中,化石能源尤其是煤炭仍占据主导地位,2019 年消费比例达到 57.7%。近年来,虽然我国单位 GDP 碳排放已明显下降,但仍高于世界平均水平,而多晶硅及晶硅光伏产业是近年来发展起来的清洁能源,有望成为实现“碳中和”目标的重要支撑。2019 年中国光伏总发电量 2 243 亿 kW·h,占全国总发电量的 3.1%,中国发展改革委规划 2050 年达到 39%,发电量 6 万亿 kW·h,减少 CO₂ 排放约 71 亿 t,光伏发电将成为碳中和的绝对主力。近年来多晶硅生产能耗及成本大幅降低,单晶硅技术和金刚线切割技术的发展使得物料消耗也大幅下降,预计未来晶硅太阳能发电将在所有发电方式中成本最低,达到 0.13 元/kW·h,这为光伏发电规划目标的实现提供了保障。

[关键词] 碳排放; 碳中和; 光伏发电; 晶硅太阳能; 多晶硅; 单晶硅; 发电成本; 能源回报率

[中图分类号] F416.32; F416.2 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2021)05-0001-06
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.05.001

2020 年 9 月,我国明确“二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”,之后,在多个领域制定了减排方案。在电力方面,提出发展风力发电、光伏发电等可再生能源,减少动力煤发电,提高能源使用效率等;在工业领域,提出在石化、化工、建材、钢铁、有色金属、造纸、航空等重点行业应用节能减排新工艺、新方法;在交通运输方面,发展电动车、氢能源车、混动车,减少石油依赖;在建筑领域,发展建筑材料与电器等的节能减排技术。

未来 40 年,“双碳”将成为中国能源转型和经济发展的主线之一,清洁能源将成为未来能源发展

新趋势。光伏在各类清洁能源中综合优势明显,有望成为“碳中和”主力,而晶硅作为光伏产业的核心材料,是碳达峰碳中和目标实现的重要驱动力。

1 我国能源消费现状及碳排放情况

1.1 能源消费现状

一次能源包括化石能源和非化石能源,化石能源有煤炭、原油和天然气,非化石能源有风能、太阳能、水力能、核能和生物质能。其中,所有化石能源和非化石能源中的太阳能、生物质能可用来为化工、动力、供热等提供能源消耗;化石能源中的煤炭和天然气及所有非化石能源可用来发电。一次能源消费构成见图 1。

当前,在我国一次能源消费中,化石能源尤其是煤炭占据主导地位,2019 年煤炭消费比例为 57.7%,非化石能源消费比例为 15.3%。近年来,非化石能源占一次消费比例逐年上升,非化石能源发电占全部一次消费比例逐年上升。

[收稿日期] 2021-07-31 [修订日期] 2021-08-30

[录用日期] 2021-09-02 [出版日期] 2021-10-28

[作者简介] 严大洲(1963—),男,汉族,中南大学硕士,教授级高级工程师,中国恩菲工程技术有限公司副总工程师,硅基材料制备技术国家工程研究中心主任。

[引用格式] 严大洲,刘艳敏,万焱,等. 晶硅太阳能在“双碳”经济中的作用与影响[J]. 中国有色冶金,2021,50(5):1-6.

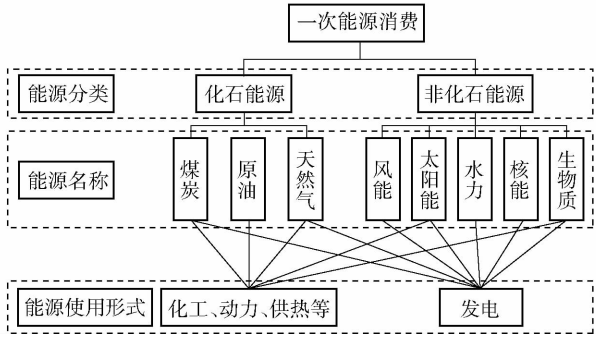


图1 一次能源消费构成

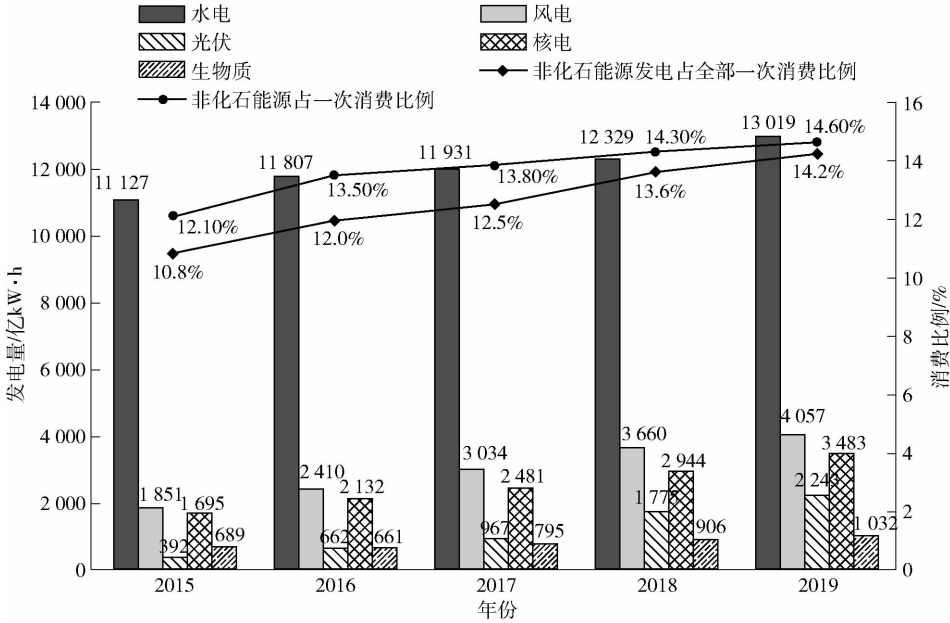


图2 2015—2019年非化石能源发电量及结构

（数据来源：根据国家能源局、CIPV、兴业证券公布数据整理）

位居第二，占比 11%；印度位居第三，占比 6.6%。中国 2020 年共排放碳 115 亿 t，电力、工业、交通运输和建筑行业是 CO₂ 排放的主要部门（表 1），有色金属行业排放 5 亿 t CO₂ [2]。虽然我国单位 GDP 碳排放已明显下降，但仍高于世界平均水平，为美国的 2 倍多，欧盟的 3 倍多。

表1 中国 2020 年碳排放情况 亿 t

排放量及占比	行业				合计
	电力	工业	交通运输	建筑等	
CO ₂ 排放量	42.55	32.2	29.9	10.35	115
占比	37	28	26	9	100%

2 “双碳”目标下我国能源规划

国际可再生能源署于 2021 年 3 月发布《世界能

我国能源消费量以吨标煤（tce）计量，2019 年我国一次能源总消费量为 48.6 亿 tce，非化石能源消费量约 7.1 亿 tce，占比仅 14.6%，发电占比 14.2% [1]。2015—2019 年非化石能源发电量及结构见图 2。

1.2 碳排放情况

据英国气候政策网站 Carbon Brief、国际可再生能源署（IRENA）2019 年统计数据报道：中国的碳排放量居世界首位，占全球碳排放总量的 27%；美国

源转型展望：1.5℃ 路径》，明确指出，到 2050 年可再生能源发电量占比提升到 90%，其中，光伏和风电占比 63%。届时，全球光伏装机将超过 14 000 GW [2]。国际能源署（IEA）在 2021 年 5 月发布了《2050 年净零排放：全球能源行业路线图》，明确到 2050 年约 90% 电力来自可再生能源，太阳能和风能占 70% 左右。

在全球减碳减排目标倡导下，我国积极响应，对国内的能源转型战略和光伏发展目标做出了规划。

1) 2020 年非化石类能源占一次能源消费总量比重 15%，2030 年实现 20%。

2) 三个顶峰 + 一个中和。2020 年中国煤炭需求达到顶峰；2025 年中国能源消费总量达到顶峰；2030 年中国二氧化碳排放达到顶峰；2060 年实现碳中和。

3)2050 年一次能源总量达 34 亿 tce,可再生能源占一次能源消费比例超 60%,非化石能源电力占总电力需求的 91%,电力消费比重从现在的不到 30% 提高到 60%。

2019 年中国光伏总发电量 2 243 亿 kW·h,占全国总发电量(71 422. 1 亿 kW·h)的 3. 1%,光伏利用小时数 1 169 h。《中国 2050 年光伏发展展望》原规划预计 2030 年提高到 5%,2040 年提高到 10%,2050 年提高到 20%。经过调整后,目前规划 2030 年达 28%,2040 年达 33%,2050 年达 39%。详细调整情况见表 2。

表 2 2020—2050 年中国光伏发电规划及调整

年份	规划光伏累计装机/GW	调整后的光伏累计装机/GW
2020	200(2%)	252. 5(实际 3. 8%)
2030	500(5%)	3 000(28%)
2040	1 000(10%)	4 000(33%)
2050	2 000(20%)	5 000(39%)

注:括号中数据为届时发电量占比

表 3 各类型太阳能光伏电池转换效率及市场份额

电池类型	材料	转换效率/%		目前状态	2020 年市场份额/%	
		实验室	规模化生产			
晶硅	单晶硅	26. 7	22. 7~24. 9	大规模量产	86. 3	95. 9
	多晶硅	24. 4	19. 3~20. 5	大规模量产	9. 6	
	硅基	21. 2	10. 8	规模量产	0. 01	4. 0
	碲化镉	22. 1	约 18. 3	规模量产	6. 2	
薄膜	铜铟镓硒	23. 4	约 18. 7	规模量产	0. 27	
	砷化镓(单结)	29. 1	约 25. 1	规模量产	0. 2	
	钙钛矿,钙钛矿/晶硅叠层	25. 5,29. 52	无	研发	0	
	其他	5~18. 2(有机)	5	小规模量产	-	
第三代	砷化镓(6 结)	47. 1	42. 4	试产	0. 1	0. 1
	砷化镓(3 叠层+聚光)					
	量子点/中间带	40~80(理论值)	无	研发	0	

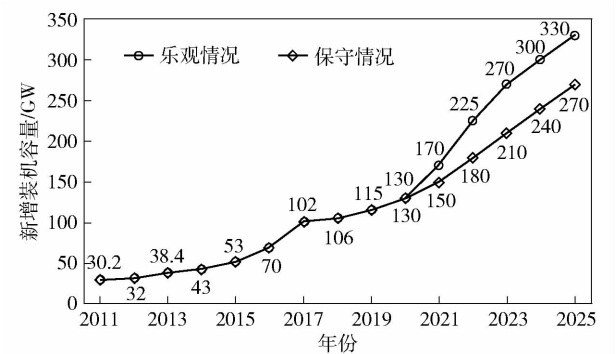


图 3 2011—2025 全球光伏新增装机容量预测

(注:数据来源于《中国 2050 年光伏发展展望》)

3 光伏产业发展现状

3.1 光伏电池技术发展现状

目前,晶硅太阳能是光伏产业的主流技术。全球范围内,太阳能光伏电池技术有晶体硅电池、薄膜电池和第三代电池三种类型,其中晶体硅电池转换效率较好,而且技术成熟,2020 年所占市场份额已达 95. 9%。三种类型光伏电池技术的详细转换效率及市场份额情况见表 3。2011—2025 年全球光伏新增装机预测见图 3。

3.2 我国光伏制造业情况

2020 年,中国已成为全球光伏制造与应用大国,光伏年产值 4 000 亿元,制造了 200 多万人的就业岗位。在能源结构调整、CO₂减排、雾霾治理等方面,多晶硅作为光伏产业重要原材料,扮演了举足轻重的角色。

2020 年世界与中国光伏制造业情况见表 4^[3]。

表 4 2020 年世界与中国光伏制造业情况

项目	全球总量	中国大陆	中国占全球比例/%
多晶硅产量/万 t	52. 1	39. 6	76
硅片产量/GW	167. 7	161. 3	96. 2
光伏电池产量/GW	163. 4	134. 8	82. 5
光伏组件产量/GW	163. 7	124. 5	76. 1
累计安装量/GW	756	252. 5	33. 4

4 晶硅太阳能利用成本呈降低趋势

4.1 多晶硅生产能耗呈下降趋势

目前多晶硅生产方法常见的有三氯氢硅法和硅烷法两种。由于硅烷法存在极易燃、易爆、安全性差等问题^[3],近 10 年来,市场份额一直在减少。三氯氢硅法是当前主流工艺,2020 年产量占比达 98.1%。

表 5 2009—2020 年多晶硅产品的综合能耗情况

能耗项	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
还原电耗/kWh·kg ⁻¹	100	80	<70	<60	<58	<57	<55	<50	<48	<45	50	49
综合电耗/kWh·kg ⁻¹	200	170	<135	<120	<110	<105	<85	<80	<75	<68	70	66.5
蒸汽消耗/kg·kg ⁻¹	160	120	80	50	40	35	26	25	23	21	28	23
综合能耗/kgce·kg ⁻¹	40.06	32.51	<24.36	<19.62	<17.42	<16.32	<12.99	<12.28	<11.47	<10.69	12.5	11.5
降低幅度/%	—	18.84	25.08	19.45	11.21	6.32	20.39	5.49	6.61	6.8	—	—

注:2018 年之前数据为某多晶硅生产企业运行值,2019 年、2020 年数据来源于《中国光伏产业发展路线图》

多晶硅产业 10 多年来,能耗、物耗的持续降低,使得产品成本大幅下降,为太阳能普及应用创造了条件。2020 年多晶硅产品综合能耗相比 2009 年降低了 70% 以上;2018 年 7 月多晶硅价格为 8 万元/t,2020 年 5 月最低降到 3 万元/t。多晶硅产业能耗物耗的降低促进了多晶硅产品价格的降低,为光伏发电降低成本创造了有利条件。

4.2 单晶硅技术与金刚线切割技术的发展大幅降低了硅料消耗

2017 年,波兰科学家 J. Czochralski 发明了直拉法(CZ 法),该方法是直接从硅熔体中生长高质量硅单晶最为成熟的方法。

太阳能单晶硅技术沿用了集成电路单晶硅拉制技术,其晶体缺陷少于多晶硅,成为制备高效晶硅电池的理想材料。随着单晶硅技术与设备创新的快速发展,单晶硅单位非硅成本大幅低于多晶铸锭成本,而且转化效率高出至少 1~2.5 个百分点。

金刚线切割技术的快速推广应用使得每公斤单晶硅出片率大幅提升,该技术不仅增加了产能、降低了硅料消耗,而且增加了太阳能晶硅片的应用范围。硅片越薄,柔性越好,对安装环境的适应性越强,薄太阳能晶硅片不仅适用于分布式光伏发电及地面电站,还可安装在复杂物体表面,扩大了单晶组件的应用。

目前,单晶硅技术已经成为晶硅产业发展的主

三氯氢硅法生产设备包括还原装备、气体净化循环利用装置、冷氢化装备、提纯系统、TCS 合成装置和反歧化系统,通过采用模拟优化、过程气体回收、物料回收等先进措施,还原热量、系统制冷等能源得到了高效、合理地回收利用,能耗物耗得到降低。目前,先进企业单位每公斤硅产品能源消耗已小于 11.5 kgce。2009—2020 年多晶硅产品的综合能耗情况见表 5。

流,产能占比在 90% 以上,而且新增产能皆为单晶。

4.3 光伏发电成本在不断降低

目前,在各种类型的发电站中,水电的发电成本最低,大概为 0.3 元/kW·h,光伏的发电成本与煤电、风电持平,大概为 0.4 元/kW·h,已实现平价上网。随着各项技术的不断进步,晶硅光伏发电成本将会大幅下降,预计到 2035 年和 2050 年,新增光伏发电成本相比当前分别下降 50% 和 70%,达到 0.2 元/kW·h 和 0.13 元/kW·h。

光伏发电成本可持续降低的因素包括以下几个方面:光伏电池效率持续快速提升;“晶硅+薄膜”双结叠层电池技术实现产业化应用;光伏组件持续降本增效;光伏电站投资成本持续下降。目前光伏电池转换效率大概为 22.3%,未来 3~5 年,效率有望提升至 24%。效率更高的 N 型 TOP-Con 电池、异质结电池或 IBC 电池等则最有望成为产业化主流技术,将转换效率提高到 26% 以上。双结叠层电池(比如钙钛矿/硅叠层电池)具有更高的转换效率。在光伏组件成本大幅降低以及转换效率持续提升的带动下,2035 年和 2050 年光伏电站投资预计将比当前的水平分别下降 37% 和 53%,这其中晶硅电池和组件价格的下降贡献最大,在光伏电站投资下降成本中的贡献超过 60%,而多晶硅在太阳能光伏系统中的成本变化则微不足道,见表 6^[4]。

表 6 2008—2020 年多晶硅在太阳能电池成本占比情况

年份	光伏系统价格/ 元·W ⁻¹	光伏组件价格/ 元·W ⁻¹	多晶硅用量/ g·W ⁻¹	多晶硅价格/ 元·kg ⁻¹	多晶硅占组件 成本比例/%	多晶硅占系统 成本比例/%
2008	50	30	9.5	1 685	53.36	32.02
2009	35	19	8	548.1	23.08	12.53
2010	25	13	7.4	340.2	19.37	10.07
2011	17.5	9	6.4	315	22.40	11.52
2012	12	4.5	6.3	226.8	31.75	11.91
2013	10	4.2	6	135	19.29	8.10
2014	9.5	3.6	5.2	153	22.10	8.37
2015	9	3.5	5	125	17.86	6.94
2016	8	3.2	4.75	110	16.32	6.53
2017	5.5	2.8	3.8	125	16.90	8.60
2018	4.5	2.3	3.4	110	15.30	8.50
2019	4.1	2.1	3.3	70	11.0	5.6
2020	4	2.0	3.0	85	12.8	6.4

5 晶硅太阳能是实现碳中和的主要途径

5.1 晶硅太阳能现状

2020 年,中国光伏已实现市场化定价,光伏累计装机量为 253.4 GW,光伏发电量占比为 3.5%。

2020 年 1 月 1 日~10 月 22 日,德国太阳能、风能、生物能、水力发电等清洁能源发电 1 950 亿 kW·h,占全国总发电量的 52.5%,其中太阳能发电 430 亿 kW·h,占全国总发电的 11.5%。

2020 年,中国太阳能光伏发电 2 605 亿 kW·h,当年生产的 39.6 万 t 多晶硅耗电约 273 亿 kW·h,占当年光伏总发电量的 10.4%。当多晶硅年产量达到 100 万 t 时,预计需消耗当年太阳能发电量的 10%~15%。

5.2 晶硅太阳能发电量预测

随着全球晶硅太阳能电站成本不断降低,光伏

电站联合储能系统将是光伏从辅助电源走向主力电源的必经之路,有望成为光伏可持续发展的动力。预计 2025 年全球光伏新增装机 368 GW,届时储能装机 56.48 GW·h,晶硅太阳能成为主体能源。2019—2025 年全球光伏装机量情况见图 4,2020—2025 年装机量为预测数据。

2019,国家发改委能源研究所在《中国 2050 年光伏发展展望(2019)》中预测,2050 年我国的光伏发电累计安装 50 亿 kW,累计发电量 60 000 亿 kW·h,发电量占比达到 39%^[5]。具体规划见表 7。

表 7 光伏电站量及发电量预测

年份	光伏累计安 装量/亿 kW	光伏累计 安装占比/%	光伏累计发 电量/亿 kW·h	光伏发电量 占比/%
2025	7.3	24	8 770	9
2030	30	39	35 000	28
2050	50	59	60 000	39

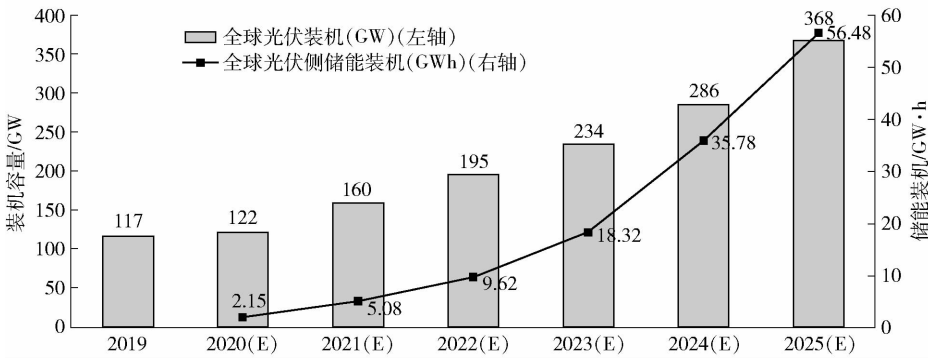


图 4 2019—2025 年全球光伏装机量情况

(数据来源:根据国际可再生能源署(IRENA)、欧洲光伏产业协会、美国太阳能工业协会(SEIA)、彭博新能源财经(BNEF)、日本光伏发电协会(JPEA)、兴业证券发布数据整理)

5.3 能源回报与环境效益

从硅石到光伏电站建设,全部能源消耗约 $0.65 \text{ kW} \cdot \text{h/W}$,能源回报期已到 0.54 年(按二类计 $0.65/1.2=0.54$),晶硅光伏电池寿命 30 年,清洁能源回报达到 55 倍。按安装 100 万 kW (1 GW) 晶硅电站计算,年发电量约 12 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$,按火力发电耗煤 $323 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ 计算,年减少耗煤 38.8 万 t, CO_2 减排 142.2 万 t, 30 年寿命期内,可实现节煤 1 164 万 t,减排 CO_2 4 266 万 t。

预计 2050 年,晶硅太阳能发电达到 6 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 占当年全国发电量的 39%, CO_2 减排约 71 亿 t, 是碳中和的绝对主力。

6 结语

在政府多项支持政策下,我国光伏发电已发展到大规模、高比例、高质量跃升阶段,而且摆脱了补贴依赖,开始实现市场化。目前光伏发电政策的新思路是建立消纳责任权重引导机制、并网多元保障机制、保障性并网竞争性配置机制,鼓励多元化开发、多元化应用,引导各地安排风电、光伏发电项目建设,采取“能并尽并”原则,通过竞争配置统一组织。

我国的多晶硅工厂主要集中在新疆、内蒙古、云

南、四川,已具备光伏产业链协同、实现碳中和的发展条件。晶硅光伏发电可结合新能源汽车和特高压技术,利用中国广阔的戈壁沙漠资源,兼顾生态修复与低成本发电,开发农光、渔光、BIPV(光伏建筑一体化)等各种创新应用,在成本持续下降的条件下,晶硅光伏发电有望成为主流电源,有助于大幅减少化石能源消耗,减少对进口石油的依赖,有效推动能源结构调整并助力雾霾治理。晶硅光伏发电技术综合效益显著,发展前景广阔。

[参考文献]

- [1] 中国光伏行业协会. 2019—2020 年中国光伏产业年度报告 [R/OL]. http://www.chinapv.org.cn/annual_report/821.html. (2020-07-08) [2021-07-20].
- [2] Global CO_2 emissions have been flat for a decade, new data reveals [EB/OL]. <https://www.carbonbrief.org/global-CO2-emissions-have-been-flat-for-a-decade-new-data-reveals>.
- [3] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2020 版) [R/OL]. http://www.chinapv.org.cn/road_map/927.html. [2021-07-20].
- [4] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2019 版) [R/OL]. http://www.chinapv.org.cn/road_map/802.html. [2021-07-20].
- [5] 国家发改委能源所. 中国 2050 光伏发展展望(2019) [R]. 2019.

Effect and impact of crystalline silicon solar energy in the “double carbon” economy

YAN Da-zhou, LIU Yan-min, WAN Ye, YANG Yong-liang, YANG Tao, SUN Qiang, ZHAO Xiong, ZHANG Sheng-xue, ZHANG Zhi-gang

Abstract: Chinese carbon emission ranks first in the world, with an amount of 11.5 billion tons in 2020. In China's primary energy consumption, fossil energy especially coal still remains dominant, which accounts for 57.7%. In recent years, although China's carbon emission per unit GDP has decreased significantly, it is still higher than the world average. The development of polysilicon and crystalline silicon photovoltaic industry is expected to become an important support for clean energy and primary measure to achieve the goal of “carbon neutrality”. In 2019, China's total photovoltaic power generation was 224.3 billion $\text{kW} \cdot \text{h}$, accounting for 3.1% of the country's total power generation. It is planned to reach 39% in 2050 when the power generation will be 6 trillion $\text{kW} \cdot \text{h}$ and the CO_2 emission will be reduced by 7.1 billion tons approximately, which is the absolute main force of carbon neutrality. In recent years, the energy consumption and cost of polysilicon production have been greatly reduced. The development of monocrystalline silicon technology and diamond wire cutting technology has greatly reduced the material consumption. It is expected that the cost of crystalline silicon solar power generation will be the lowest among all power generation modes in the future, reaching 0.13 RMB/ $\text{kW} \cdot \text{h}$, which provides a guarantee for the realization of the goal of photovoltaic power generation planning.

Key words: carbon emission; carbon neutrality; photovoltaic power generation; crystalline silicon solar energy; polysilicon; monocrystalline silicon; power generation costs; energy payback ratio